УДК 691.32:614.841.2
DOI 10.23947/2541-9129-2018-3-4-64-78

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕ ПОЖАРА

В. В. Мануйлов
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
v.manuilov2010@spark-mail.ru

Работа посвящена ультразвуковому методу исследования железобетонных конструкций после пожара. Метод основан на свойстве ультразвуковой волны изменять скорость прохождения в зависимости от степени повреждения железобетонной конструкции в результате пожара. Метод широко применяется при проведении пожарно-технических экспертиз для установления очага пожара в помещении. Цель настоящей работы — вывести формулу, связывающую коэффициент прохождения ультразвуковой волны с температурой нагрева бетона. В программном комплексе *Microsoft Excel* автором были построены графики для изучения линейной и полиномиальной зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны и температуры нагрева бетона. В результате было получено уравнение, которое устанавливает зависимость между коэффициентом прохождения ультразвуковой волны и температурой нагрева бетона. Максимальная погрешность результатов составила 20 °С при температуре нагрева бетона, равной 400 °С. На основании полученного уравнения был построен алгоритм для расчета температуры нагрева бетона и его основных прочностных характеристик по известной скорости прохождения ультразвуковой волны.

Создание программы на базе описанного в данной статье алгоритма позволит усовершенствовать ультразвуковой дефектоскоп и расширит его функции. Усовершенствованный

UDC 691.32:614.841.2
DOI 10.23947/2541-9129-2018-3-4-64-78

ON THE ULTRASONIC METHOD OF INVESTIGATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AFTER A FIRE

V. V. Manuylov
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
v.manuilov2010@spark-mail.ru

The article is devoted to the ultrasonic method of investigation of reinforced concrete structures after a fire. The method is based on the property of an ultrasonic wave to change the speed of passage, depending on the degree of damage to the reinforced concrete structure as a result of a fire. The method is widely used in the practice of fire and technical expertise to establish a fire in the room. The aim of the work is to derive a formula relating the transmission coefficient of an ultrasonic wave to the temperature of the concrete heating. The resulting formula should transmit the temperature of the fire impact to the reinforced concrete structure in the event of a fire as accurately as possible.

In the Microsoft Excel software system, graphs were constructed to study the linear and polynomial dependence of the ultrasonic wave transmission coefficient and the temperature of concrete heating. The equations obtained as a result of the study were tabulated and compared for the purpose of determining the equation with a minimum measurement error.

As a result of the study, an equation was obtained that establishes the relationship between the transmission coefficient of the ultrasonic wave and the temperature of the concrete heating. Verification of the equation obtained showed that the maximum error in the results is 20 ° C at a concrete heating temperature of 400 ° C, which is very insignificant. On the basis of the obtained equation, an algorithm was constructed for calculating the temperature of heating concrete and its main strength characteristics at a known rate of passage of an ultrasonic wave.

ультразвуковой дефектоскоп будет полезен как сотрудникам судебно-экспертных учреждений федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» в определении очага пожара, так и организациям, осуществляющим оценку остаточной несущей способности железобетонных конструкций после пожара.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковая дефектоскопия, ультразвуковой дефектоскоп, бетон, железобетонная конструкция, пожар, очаг пожара, коэффициент прохождения ультразвуковой волны, температура нагрева бетона.

Введение. Ультразвук применяют в различных отраслях человеческой деятельности — промышленности, медицине, строительстве. Ультразвуковые методы исследования основываются на свойствах ультразвука проникать через различные среды. Скорость ультразвуковой волны существенно зависит от вида среды. Наименьшую скорость распространения ультразвуковые волны имеют в газах и жидкостях, наибольшую — в твердых телах. Так, скорость ультразвука в воздухе составляет 331 м/с [1].

Ультразвуковые методы исследования нашли широкое распространение в строительстве и пожарной безопасности. Метод, основанный на исследовании строительных конструкций посредством ультразвука с целью определения дефектов и повреждений, называется ультразвуковой дефектоскопией. Строительные конструкции зданий и сооружений могут быть изготовлены из различных материалов: железобетона, стали, древесины и т. д. Каждый материал в нормальных условиях обладает определенными свойствами и имеет определенное значение скорости прохождения ультразвуковой волны. Поскольку объектом научного исследования являются железобетонные конструкции зданий, следует отметить, что скорость поверхностной ультразвуковой волны в бетоне при нормальных усло-

Creating a program based on the algorithm described in this article will improve the ultrasonic flaw detector and expand its functions. The improved ultrasonic flaw detector will be useful both to the staff of forensic institutions of the federal firefighting service "Test Fire Laboratory", in determining the fire site, and to organizations carrying out an assessment of the residual load-bearing capacity of reinforced concrete structures after a fire.

Keywords: ultrasound, ultrasonic flaw detection, ultrasonic flaw detector, concrete, reinforced concrete structure, fire, fire center, ultrasonic wave transmission coefficient, temperature of concrete heating.

Introduction. Ultrasound is used in various branches of human activity (industry, medicine, construction). Ultrasonic methods of investigation are based on the properties of ultrasound to penetrate through various media. The speed of an ultrasonic wave varies and depends on the type of medium. The lowest velocity of propagation is in ultrasonic waves in gases and liquids, the largest in solids. So, the speed of ultrasound in the air is 331 m / s [1].

Widespread ultrasonic research methods found in construction and fire safety. A method based on the study of building structures by means of ultrasound for the purpose of determining defects and damages is called ultrasonic flaw detection. Building structures of buildings and structures can be made of various materials: reinforced concrete, steel, wood and others. Each material under normal conditions has certain properties and has a certain value of the transmission speed of an ultrasonic wave. Since the object of scientific research are reinforced concrete structures of buildings, it should be noted that the speed of the surface ultrasonic wave in concrete under normal conditions is about 2000-2500 m / s [2]. The change in the structure of the material

виях составляет около 2000–2500 м/с [2]. Изменение структуры материала приводит к изменению его свойств и, следовательно, к изменению скорости прохождения ультразвука. Исследование свойств ультразвуковых волн, прошедших через материал, осуществляется специальным прибором — ультразвуковым дефектоскопом.

Метод ультразвуковой дефектоскопии в практике пожарно-технической экспертизы. В результате пожара воздействие высоких температур на железобетонную конструкцию приводит к образованию в структуре бетона дефектов и повреждений. Испарение в цементном растворе химически связанной воды и дегидратация гидроксида кальция при высоких температурах способствует появлению в структуре бетона микро- и макротрещин [3]. Разуплотнение структуры бетона приводит к образованию в его структуре воздуха. Как отмечалось выше, ультразвуковые волны в воздухе имеют наихудшее распространение по сравнению с твердыми материалами (в нашем случае твердый материал — бетон). Таким образом, повреждения и дефекты железобетонной конструкции вызывают уменьшение скорости прохождения ультразвуковой волны. Данное свойство используют сотрудники судебно-экспертных учреждений федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» (СЭУ ФПС ИПЛ).

Ультразвуковую дефектоскопию в практике экспертизы пожаров следует относить к полевым методам исследования. Для установления очага пожара сотрудник СЭУ ФПС ИПЛ с помощью ультразвукового дефектоскопа осуществляет измерение степени повреждения строительных конструкций в результате пожара [2, 4]. Здания I и II степени огнестойкости, как правило, изготовлены из искусственных каменных материалов. Широкое распространение в зданиях I и II степени огнестойкости имеет конструктивная схема, состоящая из монолитного железобетонного каркаса. Заполнение проемов в таких зданиях осуществляется с использованием кирпичной кладки

leads to a change in its properties and, consequently, to a change in the ultrasonic transmission rate. Investigation of the properties of ultrasonic waves transmitted through the material is carried out by a special instrument – an ultrasonic flaw detector.

Method of ultrasonic flaw detection in the practice of fire and technical expertise. As a result of the fire, the effect of high temperatures on the reinforced concrete structure leads to the formation of defects and damages in the structure of the concrete. Evaporation in a cement solution of chemically bound water and dehydration of calcium hydroxide at high temperatures promotes the appearance of micro- and macrocracks in the structure of concrete [3]. Distortion of the structure of concrete leads to the formation of air in its structure. As noted above, ultrasonic waves in air have the worst spread in comparison with solid materials (in our case, solid material – concrete). From all the above it follows that the damage and defects of the reinforced concrete structure cause a decrease in the speed of passage of the ultrasonic wave. This property is used by forensic experts of the federal firefighting service "Test Fire Laboratory" (FEI FFS TFL).

Ultrasonic flaw detection in the practice of fire examination should be attributed to field research methods. In order to establish a fire center, a FEI FFS TFL officer, armed with an ultrasonic flaw detector, performs a measurement of the degree of damage to building structures as a result of a fire [2, 4]. Buildings I and II degree of fire resistance, usually made of artificial stone materials. A constructive scheme consisting of a monolithic reinforced concrete skeleton is widespread in buildings of I and II degrees of fire resistance. Filling of openings in such buildings is carried out using brick masonry or concrete blocks.

или бетонных блоков. Измерение степени повреждения железобетонных конструкций сотрудником СЭУ ФПС ИПЛ, согласно [2], осуществляется в следующем порядке:

1. намечаются конструкции для обследования. Это могут быть железобетонные стены, плиты перекрытия, несущие железобетонные колонны;

2. составляется план конструкции (потолка, стены или колонны) в масштабе;

3. с шагом 25, 50 или 100 см на конструкции намечаются участки прозвучивания.

Далее сотрудник СЭУ ФПС ИПЛ включает дефектоскоп, прижимает датчики к конструкции и проводит измерение на первом намеченном участке. Поскольку в железобетонных конструкциях находится арматура, увеличивающая скорость прохождения ультразвуковой волны, то измерения необходимо проводить в двух перпендикулярных направлениях. Выбирается то измерение, где скорость прохождения ультразвуковой волны была наименьшей [2, 5].

Впоследствии, используя формулу (1), определяют коэффициент прохождения ультразвуковой волны

Measurement of the degree of damage to reinforced concrete structures by the FEI FFS TFL employee, according to [2], is carried out in the following order:

1. Designs for inspection are planned. It can be reinforced concrete walls, slabs, bearing reinforced concrete columns;

2. A design plan (ceiling, wall or column) is drawn in scale;

3. With a step of 25, 50 or 100 cm on the construction of sound areas;

Further, the employee of the FEI FFS TFL includes a flaw detector, presses the sensors to the structure and conducts the measurement on the first target section. Since in reinforced concrete structures there is an armature increasing the speed of passage of an ultrasonic wave, measurements must be made in two perpendicular directions. Of the two measurements, the measurement is chosen, where the velocity of the ultrasonic wave was the smallest [2, 5].

Subsequently, using the formula (1), determine the transmission coefficient of the ultrasonic wave.

$$K = C_{ф} / C_{0}, \quad (1)$$

где $C_ф$ — скорость прохождения ультразвуковой волны в точке измерения; C_0 — скорость прохождения ультразвуковой волны в бетоне, не подвергавшемся нагреву.

Как видно из формулы (1), чем меньше значение коэффициента K, тем более сильное повреждение имеет железобетонная конструкция.

Определив значение коэффициента K в намеченных точках конструкции или помещения, сотрудник СЭУ ФПС ИПЛ может делать выводы о местах возникновения горения и путях его распространения.

В качестве примера можно привести помещение, в котором стены выполнены из железобетона или бетонных блоков. Очаг пожара расположен в углу помещения. Если пожарная

where $C_ф$ is the velocity of the ultrasonic wave propagation at the measurement point;

C_0 is the speed of passage of an ultrasonic wave in concrete that has not undergone heating.

As can be seen from the formula (1), the smaller the value of the coefficient K, the stronger the damage has the reinforced concrete structure.

Having determined the value of the coefficient K, at the designated points of the structure or premises, the employee of the FEI FFS TFL can draw conclusions about the places of origin of combustion and the ways of its spread.

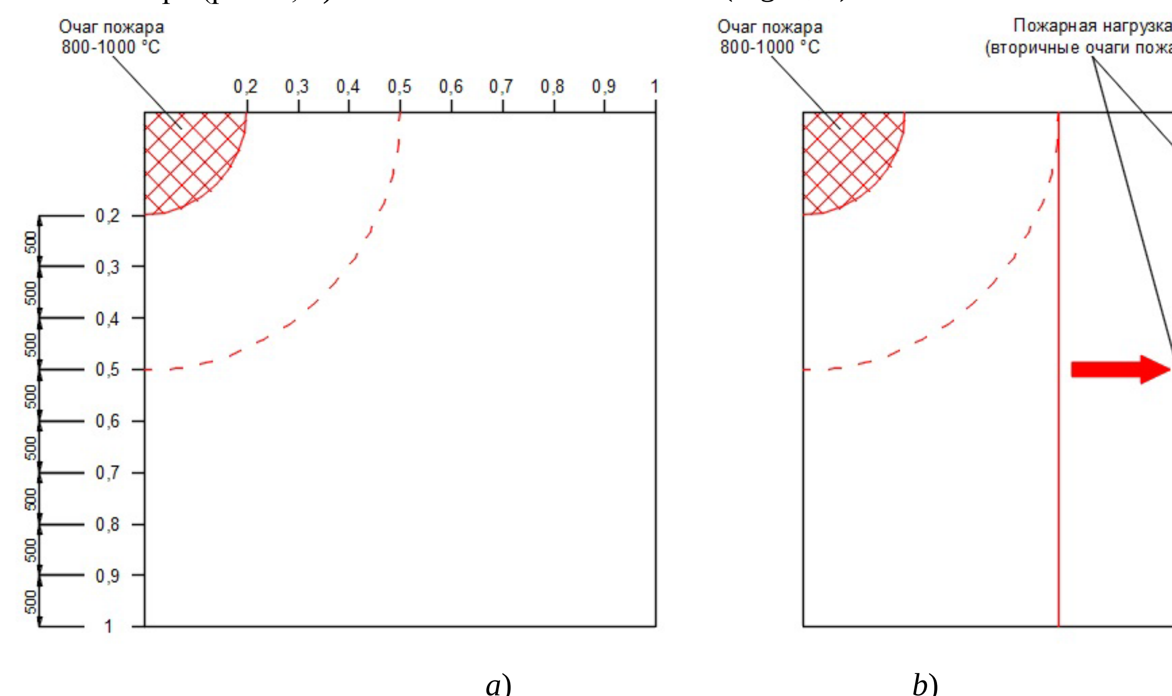
An example is a room in which the walls are made of reinforced concrete or concrete blocks. The fire is located in the corner of the room. If the

нагрузка в помещении размещена равномерно и горючие материалы имеют одинаковые пожароопасные свойства, то сотруднику СЭУ ФПС ИПЛ методом ультразвуковой дефектоскопии не составит труда определить очаг пожара в помещении (рис. 1, *a*).

В результате пожара в здании или помещении могут возникать вторичные очаги пожара или находиться места с сосредоточенной пожарной нагрузкой. Эти факторы могут осложнить работу сотруднику СЭУ ФПС ИПЛ в вопросе определения истинного (первичного) очага пожара (рис. 1, *b*).

fire load in the room is evenly distributed and the combustible materials have the same fire hazard properties, then it will not be difficult for the employee of the FEI FFS TFL to determine the fire in the room by the ultrasonic flaw detection method (Fig. 1, a).

As a result of a fire, secondary fire centers or places with a concentrated fire load may appear in a building or a building. These factors may complicate the work of the FEI FFS TFL employee in determining the true (primary) focus of the fire (Fig. 1, b).



a) *b*)

Рис. 1. Распределение коэффициента *K* в помещении пожара с равномерно распределенной пожарной нагрузкой (*a*) и с сосредоточенной пожарной нагрузкой (*b*)

Fig. 1. Distribution of the coefficient K in a fire room with a uniformly distributed fire load (a) and with a concentrated fire load (b)

Основная часть. Температуру нагрева бетона возможно определить в зависимости от значения коэффициента *K* [6, таблица 8]. Однако в настоящее время отсутствует методика, согласно которой, зная значение коэффициента *K*, можно было бы определить температуру нагрева бетона. Для нахождения формулы, связывающей температуру нагрева бетона с коэффициентом прохождения ультразвуковой волны, воспользуемся программным средством *Microsoft Excel*.

Очевидно, что зависимость между темпера-

Main part. In effect since May 1, 2018 [6] there is a table 8 according to which the temperature of heating of concrete can be determined depending on the value of the coefficient *K*. However, in no normative document there is no formula by which, knowing the value of the coefficient *K*, it would be possible determine the temperature of the concrete. To find the formula linking the temperature of heating concrete with the transmission coefficient of ultrasonic waves, you need to use the software package Microsoft Ex-

турой нагрева бетона при пожаре и коэффициентом прохождения ультразвуковой волны (*K*) — это обратно пропорциональная зависимость, то есть с увеличением температуры нагрева бетона значение коэффициента *K* уменьшается.

Для нахождения данной зависимости в программном комплексе *Microsoft Excel* на основании таблицы 8 [6] был построен точечный график, где по оси абсцисс откладывается значение коэффициента прохождения ультразвуковой волны (*K*), а по оси ординат — значение температуры нагрева бетона при пожаре. Изначально предполагая, что зависимость обратно пропорциональная, была проведена линейная линия тренда и получено уравнение $y=-719,54x+768,28$. Проверка полученного уравнения показала, что значения температуры нагрева бетона сильно отличаются от тех, которые указаны в таблице 8 [6]. Максимальная погрешность результатов наблюдается при значении коэффициента $K=0,7$ и составляет 35 °C.

Далее для анализа была взята полиномиальная линия тренда и были рассмотрены четыре уравнения разного порядка. Построены соответствующие графики, представленные на рис. 2–5.

cel.

According to logical considerations, the relationship between the temperature of concrete heating in a fire and the transmission coefficient of an ultrasonic wave (*K*) is inversely proportional, that is, with an increase in the temperature of heating concrete, the value of the coefficient *K* decreases.

To find this dependence, a point chart was plotted on the basis of Table 8 [6], where the ultrasonic wave transmission coefficient (*K*) is plotted along the abscissa axis, and the value of the concrete heating temperature during the fire is plotted along the ordinate axis. Initially assuming that the relationship is inversely proportional, a linear trend line was drawn and an equation $y = -719,54x + 768,28$ was obtained. Verification of the equation obtained showed that the values of the temperature of heating concrete are very different from those indicated in Table 8 [6]. The maximum error in the results is observed at a value of $K = 0.7$ and is 35 °C.

Next, a polynomial trend line (quadratic dependence) was taken for analysis and four equations of different order were considered. The corresponding graphs shown in Fig. 2-5.

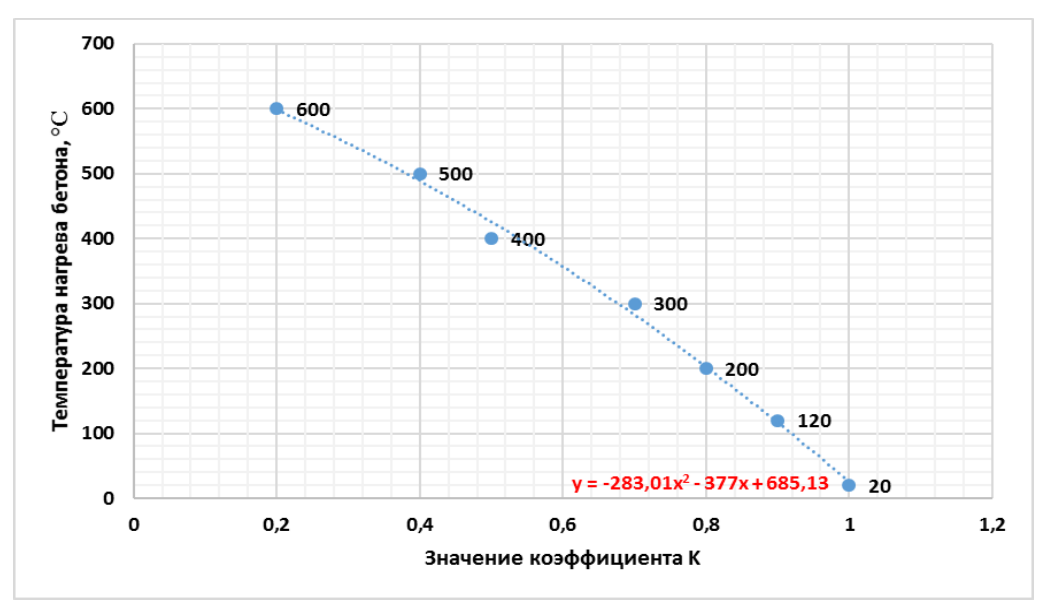


Рис. 2. Уравнение 2-го порядка $y = -283,01x^2 - 377x + 685,13$

Fig. 2. Equation of the second order $y = -283,01x^2 - 377x + 685,13$

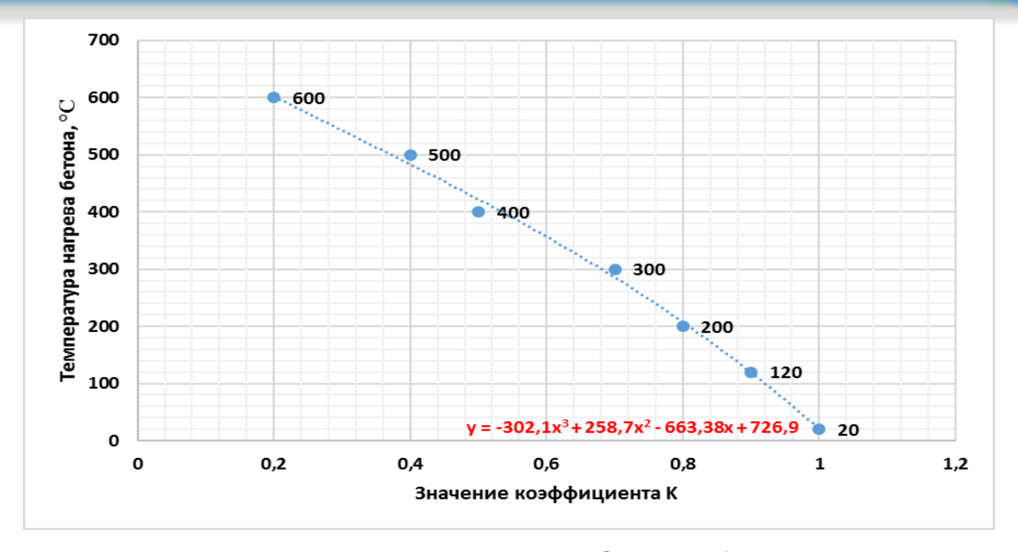


Рис. 3. Уравнение 3-го порядка $y = –302,1x^3 + 258,7x^2 – 663,38x + 726,9$

Fig. 3. Equation of the third order $y = –302,1x^3 + 258,7x^2 – 663,38x + 726,9$

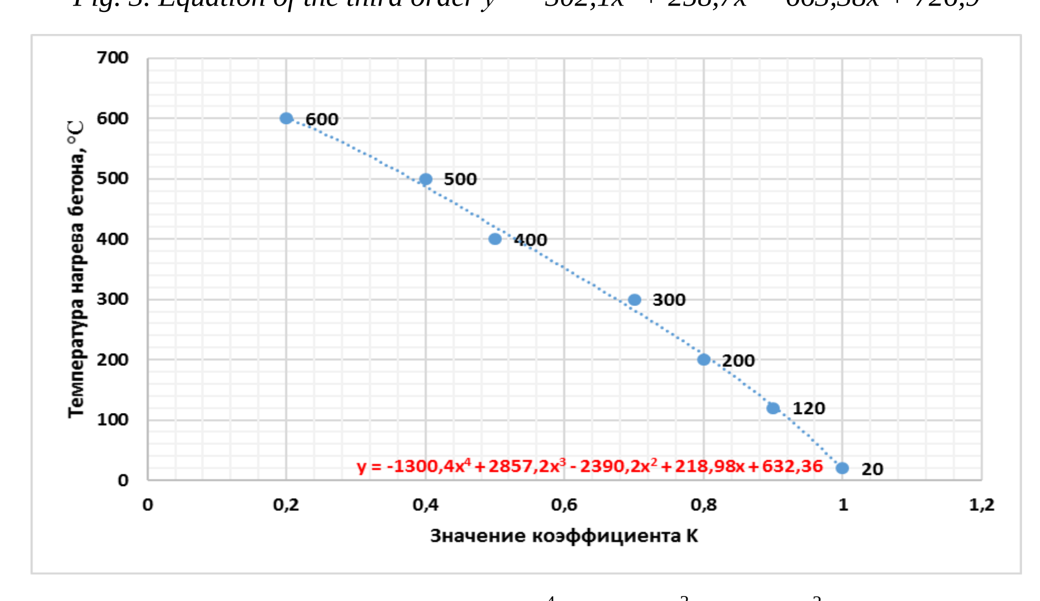


Рис. 4. Уравнение 4-го порядка $y = –1300,4x^4 + 2857,2x^3 – 2390,2x^2 + 218,98x + 632,36$

Fig. 4. Equation of the 4th order $y = –1300,4x^4 + 2857,2x^3 – 2390,2x^2 + 218,98x + 632,36$

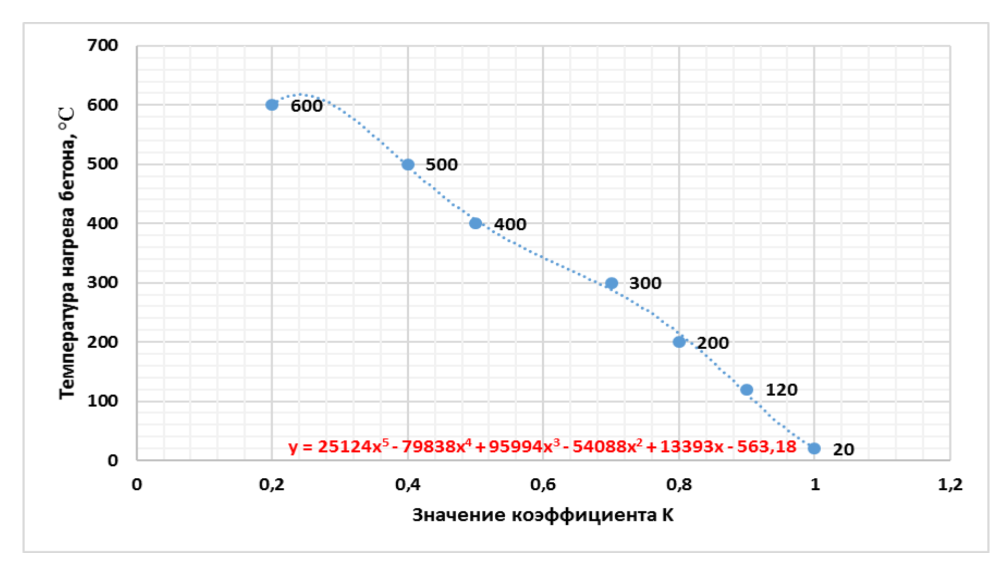


Рис. 5. Уравнение 5-го порядка $y = 25124x^5 – 79838x^4 + 95994x^3 – 54088x^2 + 13393x – 563,18$

Fig. 5. Equation of the 5th order $y = 25124x^5 – 79838x^4 + 95994x^3 – 54088x^2 + 13393x – 563,18$

Проанализировав полученные графики можно сделать вывод, что с увеличением порядка уравнения точность результатов становиться выше. В уравнении 5-го порядка, так называемая «обратно пропорциональность» нарушается, что заметно в интервале коэффициента *K* от 0,2 до 0,4. Сведем все полученные уравнения в одну таблицу и определим максимальную погрешность результатов для каждого значения коэффициента *K* (табл. 1). При этом по полученным уравнениям рассчитаем температуру нагрева бетона при *K* = 0,1; 0,3; 0,6, поскольку значений температуры для данных коэффициентов нет в таблице 8 [6].

Thus, analyzing the obtained graphs, we can say that with an increase in the order of the equation, the accuracy of the results becomes higher. In the fifth-order equation, the so-called "inverse proportionality" is violated, which is noticeable in the range of the coefficient *K* from 0.2 to 0.4. We shall not consider this equation further.

We reduce all the equations obtained in one table and determine the maximum error of the results for each value of the coefficient *K* (Table 1). In this case, from the equations obtained, we calculate the heating temperature of concrete at *K* = 0.1; 0.3; 0.6, since there are no temperature values for these coefficients in Table 8 [6].

Таблица 1
Table 1

Значение температуры нагрева бетона в зависимости от значения коэффициента прохождения ультразвуковой волны (*K*)
The value of the temperature of concrete heating, depending on the value of the transmission coefficient of the ultrasonic wave (K)

Уравнение для нахождения температуры нагрева бетона *The equation for finding the temperature of heating concrete*	Значение коэффициента *K* *The value of the coefficient K*										Максимальная погрешность измерений, °С *Maximum measurement error, °C*
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
По таблице 8 [6]	–	600	–	500	400	–	300	200	120	20	–
Линейное: $y = -719{,}54x + 768{,}28$	696	624	552	480	409	337	265	193	121	49	35
Полиномиальные: $y = -283{,}01x^2 - 377x + 685{,}13$	645	598	547	489	426	357	283	202	117	25	26
$y = -302{,}1x^3 + 258{,}7x^2 - 663{,}38x + 726{,}9$	663	602	543	484	422	357	286	207	119	20	22
$y = -1300{,}4x^4 + 2857{,}2x^3 - 2390{,}2x^2 + 218{,}98x + 632{,}36$	633	601	550	487	420	352	282	208	123	18	20

Очевидно, что наиболее точным уравнением для определения температуры нагрева бетона является уравнение 4-го порядка:

Thus, by calculating the temperature of heating concrete for each value of *K*, we can conclude that the most accurate equation for determining the temperature of heating concrete is the equation of the 4th order:

$$y = -1300{,}4x^4 + 2857{,}2x^3 - 2390{,}2x^2 + 218{,}98x + 632{,}36 \quad . \qquad (2)$$

Максимальная погрешность результатов этого уравнения составляет 20 °С, что является незначительным при температуре нагрева бетона, равной 400 °С.

Зная температуру нагрева бетона, можно определить основные прочностные характеристики бетона после пожара — нормативное и расчетное сопротивление бетона осевому сжатию (R_{bnt}, $R_{b,tem}$) и нормативное и расчетное сопротивление осевому растяжению (R_{btnt}, R_{btt}).

Представленные выше прочностные характеристики можно найти по формулам (3–6):

The maximum error in the results of this equation is 20 °C, which is quite insignificant at a concrete heating temperature of 400 °C.

Now, knowing the temperature of concrete heating, it is possible to determine the main strength characteristics of concrete after a fire – the normative and design concrete resistance of axial compression (R_{bnt}, $R_{b,tem}$) and the standard and design resistance to axial tension (R_{btnt}, R_{btt}).

The strength characteristics presented above can be found from formulas (3-6):

$$R_{bnt} = R_{bn} \cdot \gamma_{bt} \quad , \tag{3}$$

$$R_{b,tem} = R_b \cdot \gamma_{bt}, \tag{4}$$

$$R_{btnt} = R_{btn} \cdot \gamma_{tt}, \tag{5}$$

$$R_{btt} = R_{bt} \cdot \gamma_{tt}, \tag{6}$$

где R_{bn}, R_b — соответственно нормативное и расчетное сопротивление ненагретого бетона сжатию, определяемое в зависимости от класса бетона по таблице 2.1. [7]; R_{btn}, R_{bt} — соответственно нормативное и расчетное сопротивление ненагретого бетона растяжению, определяемое в зависимости от класса бетона по таблице 2.1. [7]; γ_{bt}, γ_{tt} — соответственно коэффициенты условий работы бетона при сжатии и растяжении. Данные коэффициенты зависят от вида бетона и температуры его нагрева и определяются по таблице 2.2. [7].

Поскольку обследование железобетонных конструкций проводят после пожара, то значения коэффициентов γ_{bt}, γ_{tt} следует брать в таблице 2.2. [7] под чертой.

Для исследования железобетонных конструкций после пожара, нахождения температуры нагрева бетона, нормативных и расчетных сопротивлений бетона сжатию и растяжению автором был составлен алгоритм, представленный на рис. 6.

На основании данного алгоритма можно разработать программу для ультразвукового дефектоскопа.

where R_{bn}, R_b are the normative and design resistance of unheated concrete to compression, respectively. It is accepted depending on the class of concrete according to table 2.1. [7];

R_{btn}, R_{bt} are the normative and design resistance of unheated concrete to tension, respectively. It is accepted depending on the class of concrete according to table 2.1. [7];

γ_{bt}, γ_{tt} – respectively, the coefficients of working conditions of concrete under compression and tension. These coefficients depend on the type of concrete and the temperature of its heating. Accepted equal to the table 2.2. [7].

Since the survey of reinforced concrete structures is carried out after a fire, the values of the coefficients γ_{bt}, γ_{tt} should be taken in Table 2.2. [7] under the bar.

For the investigation of reinforced concrete structures after a fire, finding the temperature of concrete heating, the standard and design resistance of concrete to compression and stretching, an algorithm was compiled in Fig. 6.

Based on this algorithm, you can develop a program for an ultrasonic flaw detector. The procedure for calculating the program using this algorithm is as follows:

Начало

$C_ф$, C_0, R_{bn}, R_b, R_{btn}, R_{bt}

$k: = C_ф / C_0$

$0 \le k \le 1$

Нет — Ошибка, неправильно введено значение $C_ф$

Да

$t: = -1300,4k^4+2857,2k^3-2390,2k^2+218,98k+632,36$

$17,94 \le t \le 20$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: $\gamma_{bt} = 1$, $\gamma_{tt} = 1$; Нет: $\gamma_{bt} = 1$, $\gamma_{tt} = 1$

$R_{bnt} = R_{bn}$
$R_{b,tem} = R_b$
$R_{btnt} = R_{btn}$
$R_{btt} = R_{bt}$

Нет

$20 < t \le 200$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: γ_{bt} = 1-0,05(t-20)/180, γ_{tt} = 1-0,4(t-20)/180; Нет: γ_{bt} = 1-0,05(t-20)/180, γ_{tt} = 1-0,35(t-20)/180

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

Нет

$200 < t \le 300$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: γ_{bt} = 0,95-0,05(t-200)/100, γ_{tt} = 0,6-0,15(t-200)/100; Нет: γ_{bt} = 0,95-0,05(t-200)/100, γ_{tt} = 0,65-0,15(t-200)/100

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

Нет

$300 < t \le 400$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: γ_{bt} = 0,9-0,1(t-300)/100, γ_{tt} = 0,45-0,15(t-300)/100; Нет: γ_{bt} = 0,9-0,05(t-300)/100, γ_{tt} = 0,5-0,15(t-300)/100

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

Нет

$400 < t \le 500$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: γ_{bt} = 0,8-0,1(t-400)/100, γ_{tt} = 0,3-0,15(t-400)/100; Нет: γ_{bt} = 0,85-0,05(t-400)/100, γ_{tt} = 0,35-0,15(t-400)/100

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

Нет

$500 < t \le 600$ — Да — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: γ_{bt} = 0,7-0,2(t-500)/100, γ_{tt} = 0,15-0,12(t-500)/100; Нет: γ_{bt} = 0,8-0,2(t-500)/100, γ_{tt} = 0,2-0,15(t-500)/100

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

t, R_{bnt}, $R_{b,tem}$, R_{btnt}, R_{btt}

$500 < t \le 600$ — Нет — Бетон на силикатном заполнителе? — Да: $\gamma_{bt} = 0,5$, $\gamma_{tt} = 0,03$; Нет: $\gamma_{bt} = 0,6$, $\gamma_{tt} = 0,05$

$R_{bnt} = R_{bn}\gamma_{bt}$
$R_{b,tem} = R_b\gamma_{bt}$
$R_{btnt} = R_{btn}\gamma_{tt}$
$R_{btt} = R_{bt}\gamma_{tt}$

ЖБК имеет сильные повреждения, поскольку температура нагрева бетона > 600 °С.
Нормативное сопротивление бетона сжатию < R_{bnt} ;
Расчетное сопротивление бетона сжатию < $R_{b,tem}$;
Нормативное сопротивление бетона растяжению < R_{btnt} ;
Расчетное сопротивление бетона растяжению < R_{btt}.

Конец

Рис. 6. Блок-схема алгоритма нахождения температуры нагрева и прочностных характеристик бетона после пожара

Fig. 6. Block diagram of an algorithm for finding the heating temperature and strength characteristics of concrete after a fire

Порядок работы программы по указанному алгоритму следующий:

1. Необходимо выбрать класс бетона, из которого изготовлена конструкция (автоматически задаются значения C_0, R_{bn}, R_b, R_{btn}, R_{bt}), затем ввести значение фактической скорости прохождения ультразвуковой волны в точке измерения $C_ф$;

2. Вычисляется значение коэффициента K по формуле (1);

3. Проверяется условие — коэффициент K должен находиться в интервале от 0 до 1. Если «Да», то программа продолжает расчет, если «Нет», на экране появляется сообщение «Ошибка, неправильно введено значение $C_ф$»;

4. Полученное значение коэффициента K подставляется в формулу (2) и определяется температура нагрева бетона;

5. Определяется интервал температур, в который попадает найденная по формуле (2) температура нагрева бетона;

Если температура нагрева бетона (t) находиться в интервале от 17,94 до 20 °С, то далее программа делает запрос «Бетон на силикатном заполнителе?». Ответ «Нет» подразумевает, что бетон на карбонатном заполнителе. В данном диапазоне температур для силикатного и для карбонатного заполнителя значения коэффициентов условий работы принимаются равными 1 (γ_{bt} = 1; γ_{tt} = 1) и значения прочностных характеристик соответствуют характеристикам бетона в ненагретом состоянии ($R_{bnt} = R_{bn}$; $R_{b,tem} = R_b$; $R_{btnt} = R_{btn}$; $R_{btt} = R_{bt}$);

Если температура нагрева бетона находится в интервале от 20 до 200 °С, программа выполняет тот же запрос, что и в предыдущем пункте алгоритма. Для бетона на силикатном заполнителе, на основании таблицы 2.2. [7], значения коэффициентов условий работы определяются методом линейной интерполяции по формулам (7) и (8):

1. It is necessary to choose the class of concrete from which the construction is made (the values C_0, R_{bn}, R_b, R_{btn}, R_{bt} are automatically set) and enter the value of the actual ultrasonic wave velocity at the measurement point $C_ф$;

2. Calculate the value of the coefficient K by the formula (1);

3. The condition is checked - the coefficient K must be in the range from 0 to 1. If "Yes", the program continues the calculation, if "No", the message "Error, incorrectly entered value $C_ф$" appears on the screen;

4. The obtained value of the coefficient K is substituted into the formula (2) and the temperature of the concrete heating is determined;

5. Next, the program finds the temperature range into which the temperature of the concrete heating found by formula (2) falls;

If the temperature of concrete heating (t) is in the range from 17,94 to 20 °C, then the program makes a request "Concrete on silicate aggregate?". The answer "No" implies that the concrete is on a carbonate aggregate. In the given temperature range, that for the silicate one, for the carbonate filler, the values of the operating conditions coefficients are assumed to be equal to 1 (γ_{bt} = 1; γ_{tt} = 1) and the values of the strength characteristics correspond to that for concrete in the unheated state ($R_{bnt} = R_{bn}$; $R_{b,tem} = R_b$; $R_{btnt} = R_{btn}$; $R_{btt} = R_{bt}$);

If the temperature of concrete heating is in the range from 20 to 200 °C, the program performs the same request as in the previous paragraph of the algorithm. For concrete on silicate aggregate, based on Table 2.2. [7], the coefficients of the operating conditions are determined by the method of linear interpolation from formulas (7) and (8):

$$\gamma_{bt} = 1–0,05·(t–20)/180, \quad (7)$$

$$\gamma_{tt} = 1–0,4·(t–20)/180. \quad (8)$$

Для бетона на карбонатном заполнителе по формулам (9) и (10):

For concrete on a carbonate aggregate according to formulas (9) and (10):

$$\gamma_{bt} = 1–0,05·(t–20)/180, \quad (9)$$

$$\gamma_{tt} = 1–0,35·(t–20)/180. \quad (10)$$

В интервале от 200 до 300 °С, для бетона на силикатном заполнителе коэффициенты условий работы определяются по формулам (11) и (12):

In the range from 200 to 300 °C, for concrete on a silicate aggregate, the coefficients of operating conditions are determined by formulas (11) and (12):

$$\gamma_{bt} = 0{,}95–0{,}05\cdot(t–200)/100, \quad (11)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}6–0{,}15\cdot(t–200)/100. \quad (12)$$

Для бетона на карбонатном заполнителе по формулам (13) и (14):

For concrete on a carbonate aggregate according to formulas (13) an0d (14):

$$\gamma_{bt} = 0{,}95–0{,}05\cdot(t–200)/100, \quad (13)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}65–0{,}15\cdot(t–200)/100. \quad (14)$$

В интервале от 300 до 400 °С, для бетона на силикатном заполнителе коэффициенты условий работы определяются по формулам (15) и (16):

In the range from 300 to 400 °C, for concrete on a silicate aggregate, the coefficients of operating conditions are determined by formulas (15) and (16):

$$\gamma_{bt} = 0{,}9–0{,}1\cdot(t–300)/100, \quad (15)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}45–0{,}15\cdot(t–300)/100. \quad (16)$$

Для бетона на карбонатном заполнителе по формулам (17) и (18):

For concrete on a carbonate aggregate according to formulas (17) and (18):

$$\gamma_{bt} = 0{,}9–0{,}05\cdot(t–300)/100, \quad (17)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}5–0{,}15\cdot(t–300)/100. \quad (18)$$

В интервале от 400 до 500 °С, для бетона на силикатном заполнителе коэффициенты условий работы определяются по формулам (19) и (20):

In the range from 400 to 500 °C, for concrete on a silicate aggregate, the coefficients of operating conditions are determined by formulas (19) and (20):

$$\gamma_{bt} = 0{,}8–0{,}1\cdot(t–400)/100, \quad (19)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}3–0{,}15\cdot(t–400)/100. \quad (20)$$

Для бетона на карбонатном заполнителе по формулам (21) и (22):

For concrete on a carbonate aggregate according to formulas (21) and (22):

$$\gamma_{bt} = 0{,}85–0{,}05\cdot(t–400)/100, \quad (21)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}35–0{,}15\cdot(t–400)/100. \quad (22)$$

В интервале от 500 до 600 °С, для бетона на силикатном заполнителе коэффициенты условий работы определяются по формулам (23) и (24):

In the range from 500 to 600 °C, for concrete on a silicate aggregate, the coefficients of operating conditions are determined by formulas (23) and (24):

$$\gamma_{bt} = 0{,}7–0{,}2\cdot(t–500)/100, \quad (23)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}15–0{,}12\cdot(t–500)/100. \quad (24)$$

Для бетона на карбонатном заполнителе по формулам (25) и (26):

For concrete on a carbonate aggregate according to formulas (25) and (26):

$$\gamma_{bt} = 0{,}8–0{,}2\cdot(t–500)/100, \quad (25)$$

$$\gamma_{tt} = 0{,}2–0{,}15\cdot(t–-500)/100. \quad (26)$$

Если же температура нагрева бетона превышает 600 °С, то программа принимает для бетона на силикатном заполнителе коэффициенты условий работы γ_{bt} = 0,5; γ_{tt} = 0,03, а для бетона на карбонатном заполнителе γ_{bt} = 0,6; γ_{tt} = 0,05.

If, however, the temperature of concrete heating exceeds 600 °C, the program takes the coefficients of the operating conditions γ_{bt} = 0,5 for concrete on a silicate aggregate; γ_{tt} = 0,03, and for concrete on carbonate filler γ_{bt} = 0,6; γ_{tt} = 0,05.

6. На данном этапе осуществляется расчет прочностных характеристик бетона по формулам (3–6).

7. Заключительным этапом работы программы является вывод результатов расчета. Здесь возможно два варианта вывода результатов:

а) Если температура нагрева бетона находиться в интервале от 17,94 до 600 °С включительно, то на экран выводится значение температуры нагрева бетона (t), нормативное сопротивление бетона сжатию (R_{bnt}), расчетное сопротивление бетона сжатию ($R_{b,tem}$), нормативное сопротивление бетона растяжению (R_{btnt}), расчетное сопротивление бетона растяжению (R_{btt});

б) Если температура нагрева бетона превышает 600 °С, то программа выводит на экран сообщение, что железобетонная конструкция имеет сильные повреждения, поскольку температура нагрева бетона > 600 °С. Нормативное сопротивление бетона сжатию < R_{bnt}, расчетное сопротивление бетона сжатию < $R_{b,tem}$, нормативное сопротивление бетона растяжению < R_{btnt}, расчетное сопротивление бетона растяжению < R_{btt}.

Заключение. Программирование ультразвукового дефектоскопа на основе разработанного автором алгоритма позволит при известной скорости прохождения ультразвуковой волны определять температуру нагрева железобетонных конструкций, а также основные прочностные характеристики бетона после пожара. Усовершенствованный ультразвуковой дефектоскоп будет полезен как сотрудникам СЭУ ФПС ИПЛ, так и организациям, осуществляющим оценку остаточной несущей способности железобетонных конструкций после пожара.

Изучение технических характеристик и принципов работы современных ультразвуковых дефектоскопов (***Starmans DIO* 1000 *LF***, **УСД-60Н**, А1040 *MIRA*, **А1220 МОНОЛИТ**), предназначенных для исследований каменных материалов, а также анализ научных работ и статей, посвященных методу уль-

6. At the next stage, after determining the coefficients of concrete working conditions, the strength characteristics of the concrete are calculated using formulas (3-6).

7. The final stage of the program is the derivation of the results of the calculation. There are two possible output options:

a) If the temperature of the concrete heating is in the range from 17,94 to 600 °C inclusive, the value of the concrete heating temperature (t), the concrete resistance of the concrete (R_{bnt}), the calculated resistance of the concrete to compression ($R_{b,tem}$), standard tensile resistance of concrete (R_{btnt}), design tensile strength of concrete (R_{btt});

b) If the temperature of concrete heating exceeds 600 °C, the program displays a message that the reinforced concrete structure is severely damaged, since the temperature of the concrete heating is > 600 °C. The normative resistance of concrete to compression < R_{bnt}, the design resistance of concrete to compression < $R_{b,tem}$, the tensile strength of concrete < R_{btnt}, the design resistance of concrete to stretching < R_{btt}.

The conclusion. Programming of the ultrasonic flaw detector according to the algorithm presented in this article will allow to determine the temperature of heating of reinforced concrete structures, as well as the basic strength characteristics of concrete after a fire, at a known ultrasonic wave transmission speed. The improved ultrasonic flaw detector will be useful both for the employees of the FEI FFS TFL, as well as for organizations that evaluate the residual load-bearing capacity of reinforced concrete structures after a fire.

Study of technical characteristics and principles of operation of modern ultrasonic flaw detectors (Starmans DIO 1000 LF, USD-60N, A1040 MIRA, A1220 MONOLITH) intended for research of stone materials, as well as analysis of scientific papers and articles devoted to the meth-

тразвуковой дефектоскопии [8–10], позволяют говорить о том, что предлагаемый в настоящей работе метод определения температуры и прочности бетона после пожара является инновационным.

Библиографический список

1. Голямина, И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И. П. Голямина. — Москва : Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.

2. Чешко, И. Д. Технические основы расследования пожаров / И. Д. Чешко. — Москва : ВНИИПО, 2002. — 330 с.

3. Милованов, А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. — Москва : Стройиздат, 1998. — 304 с.

4. Мегорский, Б. В. Методика установления причин пожаров / Б. В. Мегорский. — Москва : Стройиздат, 1966. — 348 с.

5. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности : ГОСТ 17624–2012 / Стандартинформ. — 2014. — 21 с.

6. Здания и сооружения. Правила обследования после пожара : СП 329.1325800.2017 / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — 2017. — 86 с.

7. Милованов, А. Ф. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501–006–2006) / А. Ф. Милованов. — Москва : НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2008. — 95 с.

8. Алимов, А. Г. Современные методы ультразвукового диагностирования бетонных и железобетонных конструкций сооружений, эксплуатируемых в условиях высокого водонасыщения и низких температур, для предупреждения чрезвычайных ситуаций / А. Г. Алимов, В. В. Карпунин // Технологии гражданской безопасности. — 2006. — Т. 3, № 3. — С. 36–44.

9. Сикорова, Г. А. Изучение возможности

od of ultrasonic flaw detection [8-10], allow us to say that the method proposed in this article for determining the temperature and strength of concrete after a fire is innovative.

References

1. Golyamina, I.P. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya / I.P. Golyamina. – Moskva: "Sovetskaya entsiklopediya", 1979. – 400 s.

2. Cheshko, I.D. Tekhnicheskiye osnovy rassledovaniya pozharov: Metod. posob. / I.D. Cheshko. – Moskva: VNIIPO, 2002. – 330 s.

3. Milovanov, A.F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri pozhare / A.F. Milovanov. – Moskva: Stroyizdat, 1998. – 304 s.

4. Megorskiy, B.V. Metodika ustanovleniya prichin pozharov / B.V. Megorskiy. – Moskva: Stroyizdat, 1966. – 348 s.

5. GOST 17624-2012. Mezhgosudarstvennyy standart. Betony. Ul'trazvukovoy metod opredeleniya prochnosti / Mezhgosudarstvennaya nauchno-tekhnicheskaya komissiya po standartizatsii, tekhnicheskomu normirovaniyu i otsenke sootvetstviya v stroitel'stve (MNTKS) – Moskva: Standartinform, 2014 – 21 s.

6. SP 329.1325800.2017. Svod pravil. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya posle pozhara / Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii (Minstroy Rossii) – Moskva, 2017. – 86 s.

7. Milovanov, A.F. Posobiye po raschetu ognestoykosti i ognesokhrannosti zhelezobetonnykh konstruktsiy iz tyazhelogo betona (k STO 36554501-006-2006) / A.F. Milovanov. – Moskva: NIIZHB im. A.A. Gvozdeva, 2008. – 95 s.

8. Alimov, A.G. Sovremennyye metody ul'trazvukovogo diagnostirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy sooruzheniy, ekspluatiruyemykh v usloviyakh vysokogo vodonasyshcheniya i nizkikh temperatur, dlya preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy / A.G. Alimov, V.V. Karpunin // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. – 2006. – T. 3. № 3. – S. 36-44.

9. Sikorova, G.A. Izucheniye vozmozhnosti ispol'zovaniya metoda ul'trazvukovoy

использования метода ультразвуковой дефектоскопии для исследования стальных изделий в целях пожарно-технической экспертизы / Г. А. Сикорова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2016. — Т. 2, № 1 (7). — С. 323–325.

10. Дашко, Л. В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия / Л. В. Дашко, В. Д. Синюк, Г. В. Плотникова // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 12. — С. 22–32.

Поступила в редакцию 05.02.2018
Сдана в редакцию 06.02.2018
Запланирована в номер 20.04.2018

Мануйлов Владислав Витальевич,
магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета, (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
v.manuilov2010@spark-mail.ru

defektoskopii dlya issledovaniya stal'nykh izdeliy v tselyakh pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy / G.A. Sikorova // Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. – 2016. – T. 2. № 1 (7). – S. 323-325.

10. Dashko, L.V. Ekspertnoye issledovaniye tsementnogo kamnya posle vysokotemperaturnogo vozdeystviya / L.V. Dashko, V.D. Sinyuk, G.V. Plotnikova // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2015. – T. 24. № 12. – S. 22-32.

Received 05.02.2018
Submitted 06.02.2018
Scheduled in the issue 20.04.2018

Manuylov Vladislav Vital'yevich,
graduate student of Department “Life safety and environmental protection” of the Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
v.manuilov2010@spark-mail.ru